

# 四阶 $\Delta - \Sigma$ 过抽样电路原理 及其在微弱地学信号检测中的应用

邓明, 邓靖武, 魏文博, 金胜, 谭捍东, 罗贤虎

(中国地质大学 地球物理与信息技术学院, 北京 100083)

**摘要:**传统的测量电路无法解决诸如海底大地电磁场这样微弱地学信号的检测问题。近几年诞生了一种称之为  $\Delta - \Sigma$  的电路理论以及相应的硬件芯片, 给微伏级的弱信号检测开辟一条新的技术路径。文章介绍与地学探测有关的一种  $\Delta - \Sigma$  电路类型, 该类型以低频段微弱信号为检测对象。采用系统理论和电路分析方法对  $\Delta - \Sigma$  原理作了较深入的讨论, 阐明这种电路技术对提高微弱信号观测的分辨率是有效的。结合海底大地电磁探测中的信号采集问题, 介绍了在仪器中把多路的被测模拟量变为数字量的技术过程。经对实际采集的海底信息的频谱曲线进行分析, 证实所采用的  $\Delta - \Sigma$  技术以及多路信号采集的电路方案是合理的。

**关键词:** 大地电磁; 海洋探测; 过抽样采集; 系统分析

中图分类号: P631.3<sup>+</sup>25; TM13 文献标识码: A 文章编号: 1005-2321(2002)04-0417-05

微弱的水下 MT 信号而言, 在上述先进的物探方法和电路安全措施得以实施之后, 信号分辨率于是就显得甚为关键。

分辨率问题主要体现在模数转换技术上。传统的转换方法有双积分、逐次比较、V-F 等等<sup>[1]</sup>。事实证明, 传统的方法或是在理论上受到限制, 或是在工艺上存在困难, 目前尚无法达到 20 位以上的分辨指标。20 世纪末期, 一种新的信号转换理论悄然兴起, 它的优势就在于高精度, 即以微伏级的信号分辨率作为技术特长。由于其检测方法采取增量调制式(简称为  $\Delta$ ), 而电路结构运用积分反馈求和式(简称为  $\Sigma$ ), 因而被冠以  $\Delta - \Sigma$  的名称<sup>[2]</sup>。目前, 大规模集成电路工艺已使得上述电路理论变为实用产品, 并在一些对灵敏度要求极高的测试领域内开始使

用。基于其在探测微弱信号方面的优越性, 海底大地电磁仪引进了这一电路技术。

## 1 $\Delta - \Sigma$ 理论与电路结构

将被测的模拟量变为数字量, 若以一个微增量  $\Delta$  代替原信号前后两次采样的变化值, 当采样间隔取得很小, 或者说采样频率很高时(称为过抽样), 则以  $\Delta$  为阶梯递增(或递减)的随时间的信号变化曲线, 可以用一串“1”和“0”表示的串行数据流对原模拟信号进行量化<sup>[3]</sup>。量化方法可选择为: 用“1”代表阶梯递增, 用“0”代表阶梯递减。最终所获的高密度数据流即为 A/D 转换结果。为达到精确逼近原模拟信号的目的, 需对转换过程中引起的量化噪声进行压制和滤除<sup>[4]</sup>。积分反馈求和电路正是为提高转换信噪比而设置的。以下所讨论的内容是  $\Delta - \Sigma$  电路的类型之一, 它在海底大地电磁信号采集中得到了应用。

### 1.1 $n$ 阶模型及其信噪比分析

将此类型的  $n$  阶  $\Delta - \Sigma$  电路表示为一个离散系统, 其信号流程图如图 1 所示。

收稿日期: 2002-05-09; 修订日期: 2002-05-31

基金项目: 国家“863”计划研究课题(820-03-04)。

作者简介: 邓明(1956—), 男, 副教授, 地球探测与信息技术专业, 主要从事地学仪器的教学和科研工作。

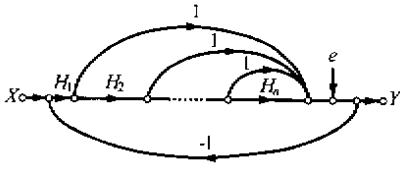


图1 n阶 Δ-Σ 电路的信号流图

Fig.1 The signal-flow graph of the n-order Δ-Σ circuit

图中, X 为被测信号, e 为量化噪声, Y 为系统输出。若图 上所标 的每个转移函数  $H_j (j = 1, 2, \dots, n)$  都实现积分器<sup>[5]</sup>的功能, 则根据 Mason 公式<sup>[6]</sup>, 对于被测信号, 系统函数为

$$H_x(z) = \frac{1 + \sum_{i=2}^n (z-1)^{i-1}}{1 + \sum_{i=1}^n (z-1)^i} \quad (1)$$

而对于量化噪声, 系统函数为

$$H_e(z) = \frac{\prod_{i=1}^n (z-1)^i}{1 + \sum_{i=1}^n (z-1)^i} \quad (2)$$

为考察图 1 系统的降噪能力, 可令同等幅值的被测信号和量化噪声经各自的输入端通过该系统, 并将两种输出功率值进行比较。为此, 设被测信号的有效值为  $\sigma_x$ 。当它以  $f_b$  为最高频率, 即  $0 < f < f_b$ , 且系统的过抽样频率为  $f_s$  时, 依照功率的求算方法<sup>[7]</sup>, 式 (1) 所表达的系统输出端的信号功率为

$$P_x = \int_0^{\frac{2\pi f_b}{f_s}} \left| \frac{1 + \sum_{i=2}^n (e^{j\omega} - 1)^{i-1}}{1 + \sum_{i=1}^n (e^{j\omega} - 1)^i} \right|^2 \sigma_x^2 d\omega \quad (3)$$

在实际应用中, 过抽样频率是很大的, 满足  $\omega =$

$\frac{2\pi f}{f_s} \ll 1$ 。因而式 (3) 有如下的近似解

$$P_x \approx \frac{2\pi f_b}{f_s} \sigma_x^2 \quad (4)$$

采用同样的作法, 也可求出系统输出端的近似噪声功率为

$$P_e \approx \frac{\sigma_e^2}{2n+1} \left( \frac{2\pi f_b}{f_s} \right)^{2n+1} \quad (5)$$

式 (5) 中的  $\sigma_e$  为量化噪声的有效值。由前面的假设条件可知:  $\sigma_e^2 = \sigma_x^2$ 。

因而系统的信噪比为

$$\begin{aligned} \frac{S}{N} &= 10 \lg \frac{P_x}{P_e} \\ &= 10 \lg (2n+1) + 20n \lg \left( \frac{f_s}{f_b} \right) - 20n \lg (2\pi) \quad (6) \end{aligned}$$

根据式 (6) 的计算结果, 可绘出图 2 的对比曲线。

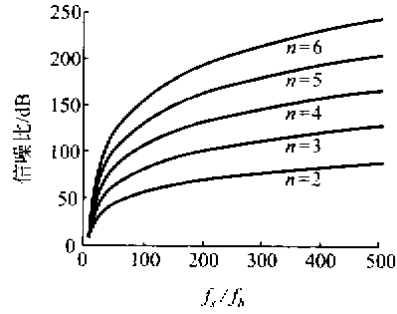


图2 不同阶数的系统抽样频率与信噪比的关系

Fig.2 The relation between the sample frequency and signal-to-noise of different systems with different orders

图 2 所提供的理论观点是 随着阶数和过抽样比的增大, 信噪比逐渐提高。这就说明, 要想得到高分辨率的采集效果, 必须采用高阶和高抽样比的电路系统。

### 1.2 四阶 Δ-Σ 电路的有效信号带宽

虽然高阶电路可提高信噪比, 但另一方面, 由系统分析理论可知<sup>[8]</sup>, 高阶系统容易产生内部正反馈, 导致系统失稳。所以至目前, 实用的 Δ-Σ 电路最高阶数为 4 阶。即使如此, 四阶系统也只满足条件稳定。在一定条件下, 电路的失稳状态与输入信号频率以及系统自身的特征有关。对系统函数作进一步的剖析后, 可了解该系统的稳态范围。

式 (1) 中  $n = 4$  和  $z = e^{j\omega}$  时, 系统的频率响应曲线如图 3。

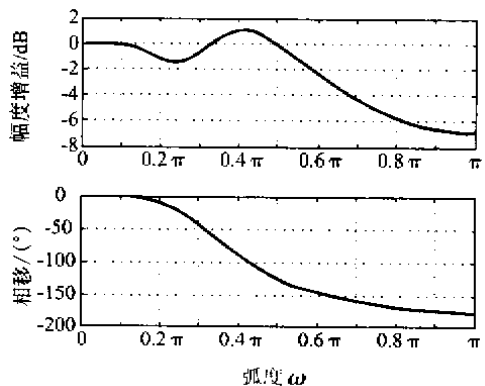


图3 四阶 Δ-Σ 系统的频率响应曲线

Fig.3 The frequency response curve of the fourth-order Δ-Σ system

分析频率响应曲线可知, 若把  $\omega = \frac{2\pi f}{f_s}$  限制在  $[0, 0.1\pi]$  区间段, 则其幅度增益为 0 dB, 相移为  $0^\circ$ , 没有产生正反馈的可能, 且系统具有无畸变的传输性能。因而把这一区段定为有效带宽可保证系统工作

在稳定状态。为达到最佳的传输目的,应合理选择  $f_s/f_s$  的比例关系。譬如,当系统的过抽样频率  $f_s$  在硬件工艺上已确定为 256 kHz 时,有用信号的频带范围  $0 < f < f_b$  应在 0 ~ 12.8 kHz 之间。上一节的讨论结果也已经表明,过抽样频率  $f_s$  应足够大,才能保证系统有较高的信噪比。可见,选定  $\omega_{max} < 0.1\pi$ ,不管是从稳定性还是从提高信号观测质量的角度,对实现高分辨率采集都是有好处的。实际上,海底大地电磁信号的有效频率成分仅为 0 ~ 100 Hz,因而使用上述电路进行数据采集完全符合技术要求。为防止测试过程中有高频成分窜入,在进入  $\Delta-\Sigma$  电路之前,可以让信号先通过一级低通滤波器,以确保系统的稳定。

### 1.3 四阶 $\Delta-\Sigma$ 电路实例

海底大地电磁仪中的 CS5321 芯片,是专门针对探测微弱的地学信号设计的,图 4 是其电路原理框图。

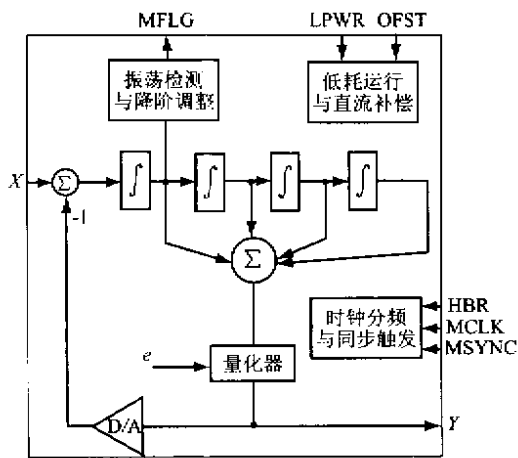


图 4 CS5321 的内部结构

Fig.4 The inner structure of the CS5321

如图 4 个积分器组成反馈求和电路。量化器送出串行数据流,其中一路作为转换结果输出,另一路经 D/A 后送回输入端,使电路成为负反馈闭环系统。信号采集过程中,振荡检测单元随时监视有无异常情况发生。一旦出现自激现象,则电路自动执行环路切换,将四阶环降为一阶环,以恢复其稳定状态。在降阶操作的同时,发出标志信息,通知后续的电路作出相应的调整。当低采样率运行时,LPWR 端接收来自控制单元的指令,令芯片进入低功耗采集方式。若测量需要,可调用直流补偿功能,以限制电路的漂移。

图 5 说明了该芯片的运行时序。当同步脉冲 MSYNC 到来后,按照 MCLK 的节拍,数据流 MDATA 被依次送出。运行当中若 MFLG 由“0”变“1”,则表明电路已作降阶调整,此时的数据精度会受影响。只有

等到稳态重新建立后,环路才自动恢复到高阶模式。该电路的过抽样频率可选择为 256 kHz (HBR = 1) 或 128 kHz (HBR = 0)。当被测幅值在  $\pm 4.5$  V、频率在 0 ~ 750 Hz 范围内变化时,分辨率指标可达到 24 位,即最小的观测灵敏度为  $0.8 \mu\text{V}$ 。采用这一电路技术,海底大地电磁信号采集可成为现实。

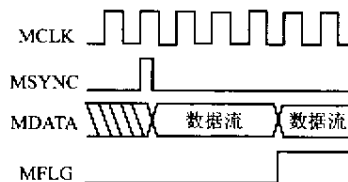


图 5 CS5321 运行时序图

Fig.5 The timing diagram for CS5321

## 2 海底大地电磁信号采集中的模数转换与数据缓存技术

在海底所测取的信号包括水平分量的各两路电场和磁场 ( $E_x, E_y, H_x, H_y$ ),以及垂直分量的磁场  $H_z$ 。此外,还包括温度、倾斜、方位、振动等海底环境信息。其中,对 5 路电磁信号以同步方式进行观测,对环境信息则以异步方式进行扫描。整套模数转换与数据缓存电路如图 6 所示。

由图可见,6 路模拟信号在同一个触发脉冲的驱动下,同步进入各自的 A/D 单元,CS5321 后面的数字滤波器对量化噪声进行滤除。该滤波器还具有数据保持功能,在下一个采样值未到来之前,当前的数据被记忆。海底大地电磁仪的最高采样率设定为 1 ms。因而,在数据读入单元以及后续的电路运行中,必须做到在 1 ms 之内完成对 6 路信号的传输处理。其中,数据读入单元按先后将 6 路信息依次读入,串并转换单元将数据流变成数据帧,每帧为 24 位,对应于一个采样点。经过标识码插入单元后,分高、中、低 3 个字节,分别进入 3 个数据缓存器中。

所谓标识码插入,与数据纠错技术有关。海底大地电磁测量周期长,数据量大。因此,应确保数据存储的可靠性。某些意外原因有可能诱发采集过程

有丢数情况发生,也不会破坏绝大部分数据的时间对应关系。这一方案虽然以牺牲部分存储空间为代价,但所换来的是存数的客观性和安全性,从技术上讲是值得的。

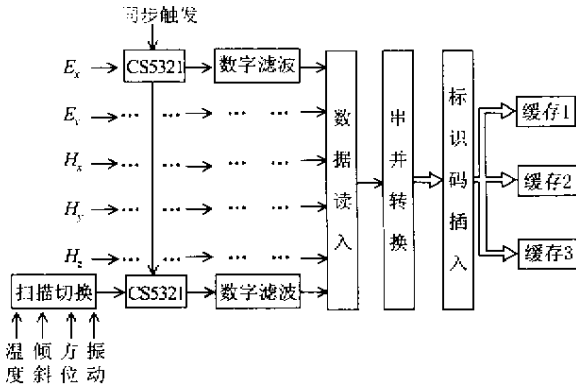


图6 海底大地电磁仪内的数字通道原理图  
Fig.6 The schematic diagram of the digital channels in the marine MT instrument

或者是存储过程的数据丢失。倘若没有预防措施,一旦丢数现象发生,就会造成大部分信息与其对应的时间错位,这给以后的数据处理带来极为不利的影响。为避免因个别数据丢失而导致全局记录错乱的情况,在缓存操作之前,给电路设置了一项标识码插入功能。其方法是在每6帧数据之间插入全“0”码或者是全“1”码,并且记录插入的时间点。这样,在测量工作完成后的数据回放阶段,可以根据标识码,找到每个数据块所对应的时间轴位置。即使是

### 3 实际测试效果评价

在我国首次进行的海底大地电磁海洋试验中,我们用自主研发的仪器系统探测到百余米水深的海底MT信息。对所获得的时间序列数据进行傅立叶变换后,可得到图7的频谱曲线。

图7中a b c d分别对应  $H_x, H_y, E_x, E_y$  等各场分量。欲将磁场信号换算为场强,可依据磁场传感器的灵敏度,即 300 mV/nT 算出,而电场观测灵敏度是被测值的 1/10,因海底的电极距为 10 m。由图可见,该测量点的磁场信号从低频至中频总的趋势由数十毫伏递减至数十微伏,而电场信号在变化趋势相近的情况下比磁场信号低一个数量级。虽然仪器所处的测量环境恶劣且干扰背景较高,但从曲线形态观察,信号幅度随频率的变化走向是明显的。由于海水对高频信号的吸收,海底大地电磁场在 1Hz 以上的中高频部分,其渐变规律是衰减的,这与陆上的场的频谱特征有较大区别,此结果符合有关的理论预测<sup>[9]</sup>。此外,从图7上还可以看出,各场分量之间有较好的相关性,这正是海底大地电磁场存在的依据之一。通过上述分析可以证实,海底的仪

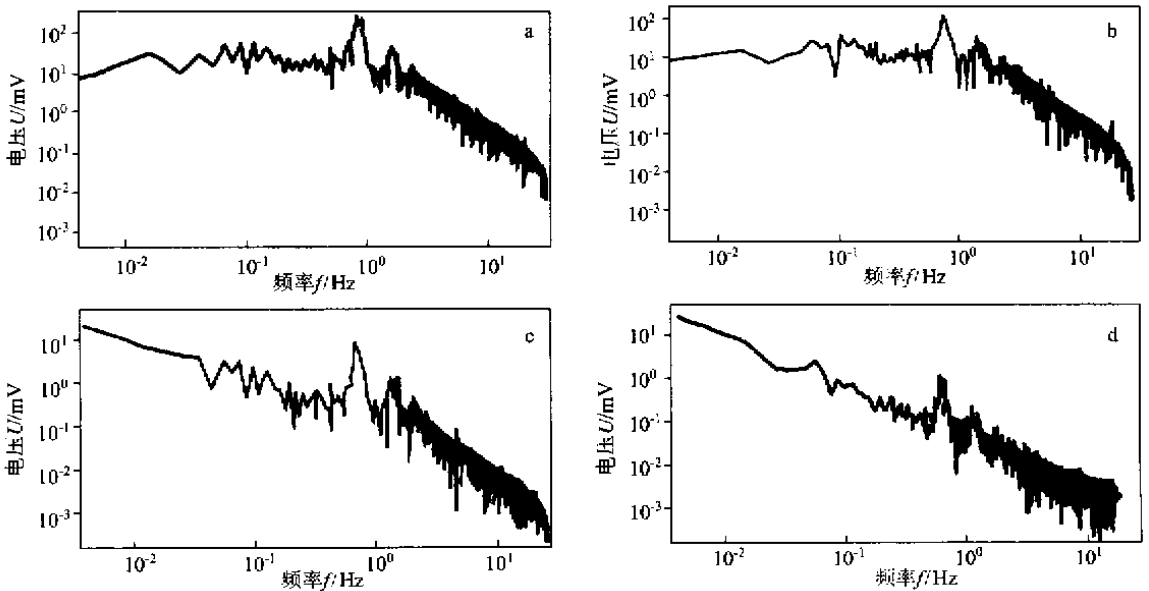


图7 我国东海某测量点的大地电磁场频谱曲线  
Fig.7 The frequency response graph of a measuring point in the East China Sea

器工作基本正常。也说明,采用  $\Delta - \Sigma$  技术进行海底大地电磁仪设计能够达到高分辨率的性能指标。

至目前,我国的海底大地电磁探测已实现了从无到有的技术跨越,随着研究的继续深入,这方面的研

究成果将不断涌现。

## References[参考文献]:

- [ 1 ] ZHAO Futu. *Data Acquisition and Control System*[ M ]. Beijing : Beijing Science and Technology Press , 1987. 28-33( in Chinese ).  
[ 赵负图. 数据采集与控制系统 [ M ]. 北京 : 北京科学技术出版社 , 1987. 28-33. ]
- [ 2 ] KOZAK M , KARAMAN M , KALE I. Efficient architectures for time-interleaves oversampling delta-sigma converters[ J ]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems* , 2000 , 47( 8 ) : 802-810.
- [ 3 ] ZIERHOFER C M. Adaptive sigma-delta modulation with one-bit quantization[ J ]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems* , 2000 , 47( 5 ) 408-415.
- [ 4 ] ALDAJANI M A , SAYED A H. Stability and performance analysis of an adaptive sigma-delta modulator[ J ]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems* 2001 48( 3 ) 233-243.
- [ 5 ] ONG C K , SIEK L , NGL S. Minimum input sensitivity of high-order multi-stage sigma-delta modulator with first-order front-end[ J ]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems* , 2000 , 47( 8 ) : 792-801.
- [ 6 ] MIN Dayi , ZHU Xueyong. *Signal and System Analysis*[ M ]. Chengdou : Chendou University of Electronic Science and Technology Publishing House , 2000. 290-293( in Chinese ). [ 闵大镒 , 朱学勇. 信号与系统分析 [ M ]. 成都 : 成都电子科技大学出版社 , 2000. 290-293. ]
- [ 7 ] ZHEN Junli , YING Qihang , YANG Weili. *Signal & System*[ M ]. Beijing : Higher Education Press , 2000. 353-357( in Chinese ).  
[ 郑君里 , 应启珩 , 杨为理. 信号与系统 [ M ]. 北京 : 高等教育出版社 , 2000. 353-357. ]
- [ 8 ] YU Zhangguan. *Automatic Control Theory*[ M ]. Harbin : Harbin Institute of Technology Press , 1996. 73-84( in Chinese ). [ 于长官. 自动控制原理 [ M ]. 哈尔滨 : 哈尔滨工业大学出版社 , 1996. 73-84. ]
- [ 9 ] WEI Wenbo , DENG Ming , TAN Handong , et al. The necessity of research the electric structure of the crust in the South China Sea by using seafloor magnetotelluric prospecting[ A ]. SU Jilan. *Prospect of Basic Research of Environment and Resource in the South China Sea*[ M ]. Beijing : China Ocean Press , 2001. 123-128( in Chinese ). [ 魏文博 , 邓明 , 谭捍东 , 等. 利用海底大地电磁探测研究南海地壳电性结构的必要性 [ A ]. 苏纪兰. 南海环境与资源基础研究前瞻 [ M ]. 北京 : 海洋出版社 , 2001. 123-128. ]

# THE CIRCUITRY OF FOURTH-ORDER DELTA-SIGMA OVERSAMPLING AND ITS APPLICATION IN DETECTING FAINT GEOSCIENCE SIGNAL

DENG Ming , DENG Jing-wu , WEI Wen-bo , JIN Sheng , TAN Han-dong , LUO Xian-hu  
( School of Geophysics and Information Technology ,  
China University of Geosciences , Beijing 100083 , China )

**Abstract :** Traditional measuring circuit can't be used to detect the faint geosciences signal such as seafloor magnetotelluric signal. The circuit theory named  $\Delta$ - $\Sigma$  and its hardware chips have been developed in recent years , which has given a new way to detect the signal in the level of microvolt. In this paper , a  $\Delta$ - $\Sigma$  circuit is introduced which relates to geoscience detecting and is used to detect faint signal. The theory of  $\Delta$ - $\Sigma$  is discussed profoundly by using system theory and circuit analysis methods. It is explained that the resolution of detecting faint signal can be improved by using the circuit. The conversion from several channels of analog signals to the digital signals is introduced with the signal acquisition in the magnetotelluric detecting. It has been testified that the  $\Delta$ - $\Sigma$  techniques and the schemes of acquisition of several channels of signal are rational by analyzing the frequency response graph of the data acquired on the seafloor.

**Key words :** magnetotelluric ; marine detecting ; oversampling acquisition ; system analysis

## 射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



### 射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

### ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



### HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

## CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



## HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书,课程从基础讲起,内容由浅入深,理论介绍和实际操作讲解相结合,全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

## 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程,培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合,全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作,同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习,可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



### 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

### 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>